

# 光纤激光非相干组束技术

赵尚弘

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 光纤激光非相干组束具有结构简单、便于控制等特点,近年来研究进展迅速,组束功率已经达到 kW 量级。综述了光纤激光非相干组束技术的最新进展,介绍了各种组束方案的基本原理,包括外腔组束、PTR 布拉格光栅组束和自适应光学元件组束等;从方案结构和实际应用 2 方面对各种非相干组束方案进行了分析比较,考虑到单模激光受大气条件影响较小,光束传输距离较远,所以自适应元件组束方案更适和用于定向能武器系统;最后指出要获得 100 kW 量级的组束激光必须解决的几个关键问题;包括提高单根光纤激光器的输出功率、解决组束元件在高功率下的形变问题和设计优化多阵元组束方案。

**关键词:** 激光技术; 光纤激光; 非相干组束; 外腔; PTR 光栅; 自适应元件

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.011

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0052-05

光纤激光器具有体积小、重量轻、效率高、光束质量好和便于热管理等优点,在工业、医疗、生物等领域具有广阔的应用前景,在军事上可作为定向能武器特别是机载激光武器系统的理想光源。近年来,随着大模面积双包层光纤的出现以及高功率二极管抽运技术的发展,单根光纤激光器的输出功率已经从最初的几百 mW 上升至 6 kW 水平<sup>[1]</sup>。然而,由于受到掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机理的限制,单根光纤激光器的输出功率很难再大幅提高<sup>[2]</sup>。此外,随着输出功率的提高,光纤激光器的光束质量还会严重恶化。激光组束是目前国际上激光技术领域的研究热点,其目的是将多束激光组合成一束输出,是大幅提升激光输出功率和亮度的有效手段。利用组束技术对光纤激光器阵列的输出进行合成,未来可获得几十至几百 kW 的输出功率,将其作为机载激光武器系统的光源,可大大增加武器系统的紧凑性和灵活性,增大武器系统的杀伤力和威慑力。

激光组束技术可分为相干组束和非相干组束两大类。相干组束要求所有阵元输出光束的波长和偏振方向一致,并且需要对每路光束的相位进行严格的检测和控制,实现起来比较困难。非相干组束对各阵元输出光束的偏振方向和相位没有限制,只要求其波长处于组束元件的频谱范围内,实现功率的标量叠加。这种组束方法结构简单、系统稳定且易于控制,近年来逐渐成为光纤激光领域的研究热点<sup>[3]</sup>。国内外研究人员在光纤激光非相干组束方面做了大量的研究工作,先后提出了多种组束方案,归纳起来主要分为外腔组束、PTR 布拉格光栅组束和自适应光学元件组束 3 大类。虽然还有一种偏振组束方案,但由于只能实现两束偏振方向相互垂直光束的合成,功率提升能力有限,很少被人研究。

本文综述了光纤激光非相干组束技术的最新进展,介绍了各种组束方案的基本原理;然后对各种组束方案的优缺点进行了分析比较,最后指出要获得 100 kW 量级的组束激光必须解决的关键问题。

## 1 光纤激光非相干组束的研究进展

### 1.1 外腔组束

\* 收稿日期: 2010-05-07

作者简介: 赵尚弘(1964-),男,甘肃临洮人,教授,博士生导师,主要从事光通信与激光技术研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

1999 年,美国 MIT 林肯实验室的 Cook<sup>[4]</sup>等首次提出了基于闪耀光栅的外腔组束方案,见图 1。镀有反射膜的光纤阵列输出端和输出耦合镜构成外腔。光纤输出端和闪耀光栅分别位于变换透镜的前后焦平面上。变换透镜把每个光纤阵元的位置按角度定位到光栅上,每个阵元的工作波长由光栅确定。输出耦合镜是一个部分反射镜,可为各阵元提供反馈并控制各光束共向传播,实现光束的功率叠加。Cook 利用该方案对 2 个掺 Yb 光纤激光器组束,获得 223 mW 的输出功率。

为获得更好的光束质量和更高的输出功率,2003 年 Augst 等<sup>[5]</sup>提出了基于 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构的外腔组束方案,见图 2。主振荡器输出功率的一部分耦合进功率放大器中,另一部分功率则通过 V 形槽光纤阵列输出到外腔中。每个激光器都运转在外腔确定的波长下,功率放大器的输出光由另一个相同的光栅进行组合。该方案将确定激光时间频率特性的部件与功率放大部件相分离,在低功率水平下解决了掺 Yb 光纤激光器的激光产生问题,而功率放大器仅仅放大功率。Augst 等实验组合了 5 个掺 Yb 光纤激光器,在总功率为 8.4 W,光栅平均衍射效率为 72%的条件下,获得 6 W 的组束输出,光束质量因子  $M^2 = 1.14$ 。Aculight 公司的 Loftus 等<sup>[6]</sup>进一步将 MOPA 方案的主振荡器结构进行了改进,见图 3。该结构利用振幅调制器把各阵元的连续光输出转变成脉冲序列,使脉冲宽度小于受激布里渊散射的建立时间,从而有效抑制了掺杂光纤的受激布里渊散射。2007 年,Loftus 报道了 3 光纤激光器的组束实验,在各阵元功率分别为 170 W、190 W、201 W 的情况下,得到 522 W 的功率输出,组束效率为 93%,光束质量因子  $M^2 \approx 1.2$ 。

2009 年,德国的 Wirth 等<sup>[7]</sup>利用光子晶体光纤作为前置放大器,进行了 4 光束 MOPA 外腔组束实验,基本结构见图 4。种子光由波长可调谐的窄带二极管激光器提供,后面设置了两级前置放大单元。经过一级放大后,获得约 500 mW 的线偏振光,然后进入保偏光子晶体光纤构成的二级放大器,获得功率约为 20 W 的线偏振衍射极限激光输出,作为主放大器的种子光。主放大器的增益介质为 15 m 保偏掺 Yb 光纤,阵元波长间隔为 5 nm,光栅对 1 064 nm 波长附近的 TE 波和 TM 波的衍射效率分别为 99% 和 98%。实验中在总抽运功率为 3 395 W 的条件下获得了 2 065 W 的组束激光输出,总的斜效率(包含光栅衍射效率)达到 61%,组束效率(组束功率与 0 级衍射光功率的比值)达到 99%。

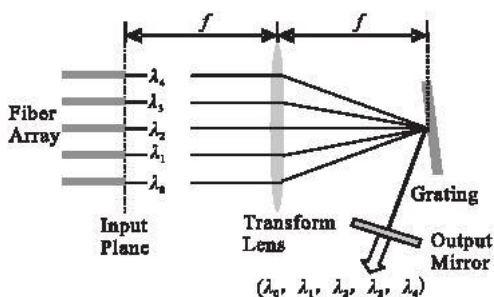


图 1 外腔组束原理图

Fig. 1 Schematic diagram of beam combining with outer cavity

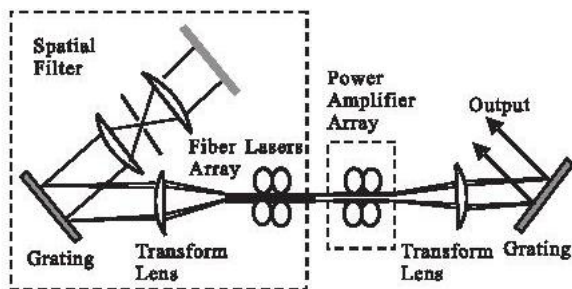


图 2 MOPA 结构外腔组束原理图

Fig. 2 Schematic diagram of beam combining based on MOPA

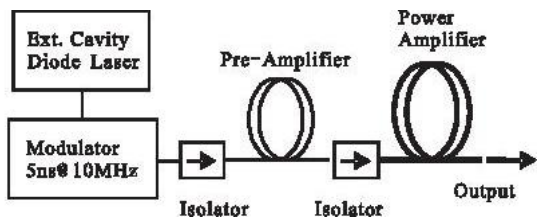


图 3 改进的 MOPA 主振荡器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of improved master oscillator of MOPA

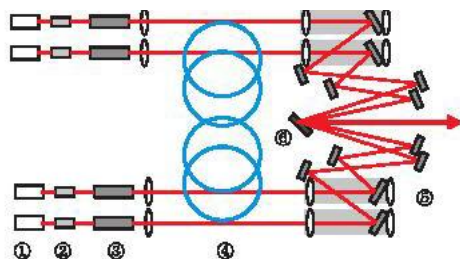


图 4 利用光子晶体光纤的 MOPA 结构组束

Fig. 4 Beam combining of photonic crystal fibers by MOPA

## 1.2 PTR 布拉格光栅组束

PTR 布拉格光栅是在光-热-折射(Photo-Thermo-Refractive, PTR)无机玻璃中记录的体全息光栅,这种光栅在 350-2 700 nm 的光谱范围内具有优于 95% 的衍射效率,温度耐受性超过 400 °C。基于 PTR 布拉格光栅的组束方案是由佛罗里达大学的 Ciapurin<sup>[8]</sup> 等提出的,该方案利用了体布拉格光栅的一个重要特性——对满足布拉格条件的光束具有接近 100% 的衍射效率,对不满足布拉格条件的光束几乎能够完全透射。2003 年, Ciapurin 等利用透射 PTR 布拉格光栅对 2 个 100 W 掺 Yb 光纤激光器进行组束,原理见图 5。波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的 2 束光同时入射 PTR 布拉格光栅,  $\lambda_1$  由于满足布拉格条件而被高效衍射,  $\lambda_2$  不满足布拉格条件表现为透射,只要仔细调整  $\lambda_2$  的入射角就可使其透射光的方向与  $\lambda_1$  衍射光的方向完全相同,实现 2 束光功率的空间叠加。实验获得 155 W 的组束输出,组束效率优于 75%。

为了提升组束功率,2006 年, Glebov 等<sup>[9]</sup> 提出了基于反射体 PTR 光栅的多阵元组束方案,见图 6。2008 年, Andrusyak<sup>[10-11]</sup> 等报道了利用反射体 PTR 光栅对 5 路掺 Yb 镜光纤激光器组束的实验结果,在每路光纤激光器输出 160 W 功率的条件下,获得 770 W 的最大组束输出,组束效率为 91.7%,光束质量因子  $M^2 = 1.14$ 。

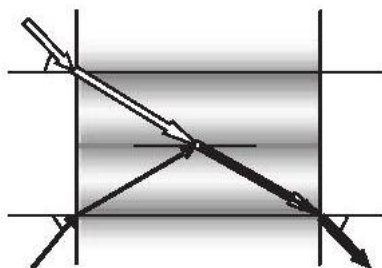


图 5 基于透射体 PTR 光栅的组束示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of beam combining based on transmitted PTR grating

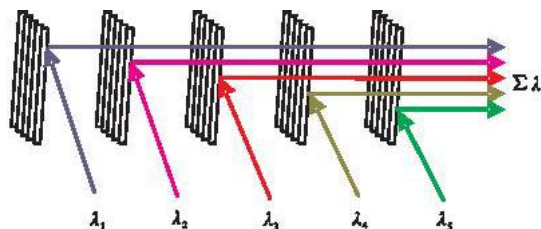


图 6 基于反射体 PTR 光栅的 5 阵元组束示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of beam combining for 5 beams based on reflective PTR grating

## 1.3 自适应光学元件组束

美国海军研究实验室的 Sprangle 等<sup>[12-13]</sup> 研究了利用自适应光学元件进行非相干组束的方案,并且给出了首次外场试验的结果。试验原理见图 7,4 个单模光纤激光器通过光束定向器在距离 1.2 km 处的目标上进行功率叠加。光束定向器由 4 个光纤输出耦合器和可独立控制并具有自适应能力的反射镜构成。每个反射镜都可将对应的激光束导引至目标同一区域。光束定向器的原理见图 8。试验中,考虑到光束定向器的热稳定性和大气热晕的影响,所有激光器都只输出一半功率,总发射功率为 3 kW,经过 1.2 km 的大气传输,在半径为 10 cm 的目标上获得 2.8 kW 的组束功率,组束效率(接收总功率与发射总功率的比值)优于 90%。

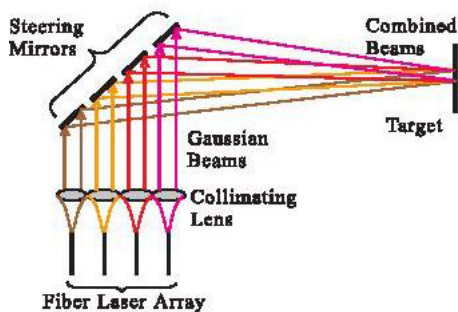


图 7 适应光学元件非相干组束示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of beam combining with adaptive optics

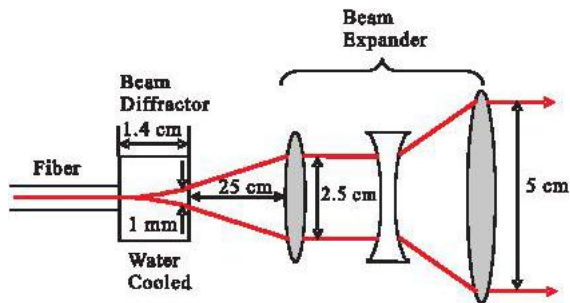


图 8 光纤输出耦合与扩束示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of fiber output coupler and beam expander

## 2 组束方案的比较分析

下面我们将方案结构和实际应用 2 方面对上述几种非相干组束方案的优缺点进行分析和比较。

## 2.1 方案结构的比较

1) 外腔组束方案充分利用了衍射光栅的谱选择特性,所需光学元件较少,结构紧凑,可实现单束激光输出。但由于只采用一个光栅作为组束器,且要求各光纤激光器的输出频谱互不重叠,这与有限的光栅频谱范围相矛盾,导致组束阵元数目受到限制。若通过减小各阵元间频谱间隔来增加阵元数目,则对光纤激光器的振荡要求较高。此外,由于大多数阵元是离轴的,因此对传输透镜的要求非常严格,否则会导致输出光束质量下降,光纤激光器效率降低和阵元谱宽加大。

2) PTR 布拉格光栅组束方案充分利用了体光栅具有极窄谱选择性的特点,同时解决了高功率条件下光栅形变的问题。该方案原理简单,要求各光束间频谱互不重叠,但由于每个体光栅只能实现2束光的合成,随着组束阵元数目的增加,光栅数目也要相应增加,系统复杂程度、体积迅速增大。此外,为实现高效组束,该方案要求光栅的谱选择性和角选择性分别大于被组束激光的谱宽和发散角,这在多阵元组束时对 PTR 布拉格光栅衍射特性的要求很高,使光栅设计加工难度增大。

3) 自适应元件组束方案中各光束的传输方向可由相应的导引反射镜单独控制,因此对各光束的频谱没有要求,即使各阵元的输出频谱互相重叠,也能够通过由自适应元件控制的反射镜导引至特定距离处实现功率叠加。该方案需要元件较多,结构复杂,不能实现所有光束的同向传输。此外,由于需要对每束光的传输方向单独控制,随着阵元数目的增加,自适应元件阵列的体积、重量相应增大,控制难度急剧增加。

## 2.2 实际应用的比较

1) 外腔组束和 PTR 光栅组束方案都可使所有阵元的输出组合成单束激光输出,输出激光中包含了多个互不重叠的光谱分量,因此光束质量不高,可看作多模激光。应用于定向能武器进行长距离传输时,由于多模激光受大气湍流和衍射的影响较严重,光束发散角随传输距离的增加而增大,因此有效传输距离较短,且由于光束的频谱成分较多,难以采用相位共轭方法增加光束的传输距离。同时,由于光束的发散,光斑尺寸增大,单位面积内的功率下降,导致武器系统的效率降低。在工业应用方面,如精密切割、打孔等,这2种方案都只需要一套聚焦系统就可完成光束聚焦,因此光束聚焦所需元件较少,结构简单。但由于不同波长的激光经同一聚焦系统聚焦后的焦点位置不同,沿光轴前后分布,不能完全重合,因此光斑尺寸不能达到最小,不利于提高加工精度。

2) 自适应元件组束方案中每个阵元的输出光谱间没有互不重叠的限制,每个阵元不仅可运行于单模状态,而且每个阵元的输出激光波长还可相同。在应用于定向能武器系统时,每个阵元输出的单模激光不仅光束质量较高,而且可由对应的反射镜单独控制其传输方向,通过光束定向器扩束后,在瑞利长度范围内其光束发散角受大气湍流和衍射的影响远比多模激光小,因此光斑尺寸基本没有变化,传输距离远,传输效率高。当大气条件不够理想时,还可通过相位共轭法来自适应修正大气对光束的影响,提高武器系统的效率。在工业应用方面,为了聚焦每个阵元的输出光束,必须采用相应数目的聚焦系统。当每个阵元的输出激光波长不同时,聚焦系统的参数也不相同,因此系统结构复杂,调整难度大。但由于每个反射镜可将对应阵元输出的光束导引至同一点,因此可使所有光束的焦点重合,聚焦后的光斑尺寸达到最小,能量集中,有利于实现高精度的切割、打孔等。

## 3 结束语

光纤激光非相干组束技术可实现光纤激光器阵列输出功率的叠加,是获得高功率、高亮度光纤激光的有效途径。对  $N$  个光纤激光器非相干组束,总的组束功率可为单个光束的  $N$  倍。近年来光纤激光非相干组束技术的研究进展迅速,组束功率不断提高,光束质量也保持在较高的水平。各种组束方案层出不穷,各有优缺点,需根据实际应用加以选择。在应用于定向能武器尤其是机载激光武器系统时,由于光束传输(作战)距离较远,考虑到单模激光受大气条件影响较小,选择自适应元件组束方案比较合适。目前,光纤激光非相干组束技术的研究大多还处于实验室阶段,实际组束功率还只有 kW 量级水平,要达到 100 kW 量级的定向能武器功率需求,还需要解决几个关键问题:一是尽量提高单根光纤激光器的输出功率,这包括提高二极管抽运源输出功率和改进光纤设计加工技术2个方面;二是解决组束元件在高功率下的形变问题,这需要在材料领域实现突破,寻找具有更好光、热和机械稳定性的材料和加工工艺;三是设计出能够实现更多阵元高效组束的方案,在组束效率、光束质量和系统稳定性三者之间实现优化。

## 参考文献:

- [ 1 ] Gapontsev D. 6 kW CW Single Mode Ytterbium Fiber Laser in All - fiber Format [ C ] // Solid State and Diode Laser Technol Rev (SSDLTR). Albuquerque, NM: [ s. n. ], 2008.
- [ 2 ] 肖瑞, 侯静, 姜宗福, 等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究 [ J ]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464 - 6469.  
XIAO Rui, HOU Jing, JIANG Zongfu, et al. Experimental re Search of Coherent Combining of Three Fiber Amplifiers [ J ]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6464 - 6469. (in Chinese)
- [ 3 ] Fan T Y, Sanchez A. Coherent (Phased Array) and Wavelength (Spectral) Beam Combining Compared [ J ]. Proc of SPIE, 2005, 5709: 157 - 164.
- [ 4 ] Cook C C, Fan T Y. Spectral Beam Combining of Yb - doped Fiber Lasers in an External Cavity [ J ]. OSA Trends in Optics and Photonics, 1999, 26: 163 - 166.
- [ 5 ] Augst S H, Goyal A K, Aggarwal R L, et al. Wavelength Beam Combining of Ytterbium Fiber Lasers [ J ]. Opt Lett, 2003, 28(5): 331 - 333.
- [ 6 ] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, et al. 522 W Average Power, Spectrally Beam - combined Fiber Laser with Near - diffraction - limited Beam Quality [ J ]. Opt Lett, 2007, 32(4): 349 - 351.
- [ 7 ] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. 2 kW Incoherent Beam Combining of Four Narrow - linewidth Photonic Crystal Fiber Amplifiers [ J ]. Opt Exp, 2009, 17(3): 1178 - 1183.
- [ 8 ] Ciapurin I V, Glebov L B, Glebova L N, et al. Incoherent Combining of 100 W Yb - fiber Laser Beams by PTR Bragg Grating [ J ]. Proc of SPIE, 2003, 4974: 209 - 219.
- [ 9 ] Glebov L B. High Brightness Laser Design Based on Volume Bragg Gratings [ J ]. Proc of SPIE, 2006, 6216: 621601 - 621611.
- [ 10 ] Sevan A, Andrusyak O, Ciapurin O, et al. Efficient Power Scaling of Laser Radiation By Spectral Beam Combining [ J ]. Opt Lett, 2008, 33(4): 384 - 386.
- [ 11 ] Andrusyak O, Smirnov V I, Venus G, et al. Applications of Volume Bragg Gratings for Spectral Control and Beam Combining of High Power Fiber Lasers [ J ]. Proc of SPIE, 2009, 7195: 71951Q.
- [ 12 ] Sprangle P, Penano J, Hafizi B, et al. Incoherent Combining of High - Power Fibers Lasers for Long - range Directed Energy Applications [ J ]. Directed Energy, 2007(2): 273 - 284.
- [ 13 ] Sprangle P, Ting A, Penano J, et al. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High - power Fiber Lasers for Directed - energy Applications [ J ]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(2): 138 - 148.

(编辑:徐楠楠)

## Incoherent Beam Combining Technologies for Fiber Laser Arrays

ZHAO Shang - hong

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Laser beam combining is, at present, a worldwide hot spot of research in the field of laser technology. It is an effective approach to scale laser output power and brightness greatly by combining some individual laser beams into one beam for output. The incoherent beam combining of fiber laser arrays features of simple configuration and is easy to control. The research on it has been developed rapidly in recent years and the combined output power has already reached the order of kilowatt level. Recent progress of incoherent beam combining of fiber laser arrays is reviewed. The fundamental principles of various types of combining scheme, including the incoherent beam combining with outer cavity, the incoherent beam combining based on PTR Bragg grating and the incoherent beam combining using adaptive optics, are presented. From both aspects of scheme's configuration and practical application, the advantages and disadvantages of these schemes are analyzed and compared. Since single - mode laser is less affected by atmospheric conditions and propagates more far than multi - mode laser, the incoherent beam combining scheme based on adaptive optics is more suited to be used as the light source of directed energy system. Finally, some key problems blocking the combined output power scaling to the order of 100kW level are pointed out, which involve increasing the output power of individual fiber laser, settling the distortion of combining element under high power and designing and optimizing the combining scheme of more beams.

**Key words:** laser technology; fiber laser; incoherent beam combining; outer cavity; PTR grating; adaptive optics